



L'intégration, art ou science ?

Bernard Chevassus-Au-Louis, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris

Michel Génard, Inra Avignon | Jean-Christophe Glaszmann, Cirad ?

Robert Habib, Cirad ? | François Houllier, Inra Paris | Renaud Lancelot, Cirad

Montpellier | Éric Malézieux, Cirad ?? | José Muchnik, Inra Montpellier

Résumé

Nous défendons dans cette étude l'idée que l'intégration doit jouer à l'avenir un rôle central dans les recherches sur l'agriculture, l'alimentation et la gestion des territoires ruraux.

En partant de définitions de l'intégration fondées sur l'importance d'un inventaire exhaustif des composantes d'un système, sur l'existence d'interactions nombreuses et complexes entre ces composantes et sur l'émergence de propriétés originales liées à ces interactions, nous soulignons tout d'abord les limites des approches "réductionnistes", qui n'étudient, et de manière séparée, que les composantes considérées comme "majeures" d'un système agricole ou agroalimentaire.

Nous analysons ensuite les raisons qui poussent aujourd'hui à renforcer cette approche, en distinguant celles liées à la dynamique de la science et celles issues de nouvelles interrogations de la société. Dans le premier cas, la possibilité d'étudier de nouveaux niveaux d'organisation du vivant, en particulier cellulaires et moléculaires, se combinent aux progrès des sciences de l'information pour inciter à intégrer les connaissances issues de ces niveaux dans les modèles existants. Mais ces évolutions, en particulier les travaux sur les systèmes non-linéaires, soulignent également, à chaque niveau d'organisation, l'émergence de phénomènes spécifiques, qui doivent donc être étudiés à ce niveau. Les évolutions de la société poussent quant à elles à prendre en compte des dimensions nouvelles - comme les conséquences des changements climatiques - ou négligées par les approches agronomiques classiques, comme la dynamique des territoires ou les impacts de l'agriculture sur l'environnement.

Trois domaines où cette question de l'intégration nous semble particulièrement stratégique sont ensuite examinés. Le premier est celui des différentes échelles spatio-temporelles auxquelles se déroulent les processus agronomiques. Nous insistons sur le potentiel d'innovation que présente la combinaison pertinente d'actions à ces différents niveaux. Le second est celui de l'intégration des disciplines "biotechniques" et "sociétales" pour prendre en compte le caractère "hybride" de nombreux objets agronomiques, qu'il s'agisse de l'alimentation, des OGM ou du génie écologique. Le dernier domaine évoqué est celui des acteurs impliqués dans les processus agricoles au sens large - ou concernés par eux - et de leur diversité croissante, qui oblige à comprendre les logiques d'action de ces différents acteurs pour analyser des phénomènes comme le développement d'espèces invasives, les conflits d'usage

pour la gestion d'une ressource ou pour faire interagir savoirs profanes et savoirs experts dans la production d'innovations.

La dernière partie de cette étude propose cinq interrogations-clés pouvant baliser une démarche d'intégration. La première concerne les finalités, c'est-à-dire les enjeux visés par une telle approche. Elle s'articule autour du dilemme entre l'optimisation agronomique classique, en univers prévisible et, souvent, monocritère, et la recherche d'autres propriétés, viabilité en univers incertain ou critères du développement durable. La seconde interrogation porte sur les composantes que l'on souhaite intégrer, avec la question de l'usage pertinent du principe de parcimonie et celle d'une anticipation du comportement de composantes biologiques ou sociales, et donc évolutives, lorsqu'elles seront impliquées dans un processus d'intégration. Vient ensuite la question de la définition de "l'architecture" choisie, c'est-à-dire de l'organisation spatio-temporelle des différentes composantes, qui conditionnera au moins autant les propriétés du système intégré que les caractéristiques propres à chaque composante. La quatrième interrogation porte sur la conduite d'un processus d'innovation, avec la préoccupation d'identifier et de prendre en compte l'émergence, au cours du processus, de propriétés imprévues. Enfin, nous posons la question de l'évaluation d'une telle démarche. Nous insistons sur la nécessité de juger de son efficacité avec des critères adaptés, qu'il s'agisse du recul temporel nécessaire, de l'appropriation effective par les utilisateurs visés ou des conséquences en terme d'amélioration du "capital humain".

En conclusion, nous soulignons combien le fait de présenter l'intégration comme un aspect, et une responsabilité, de la démarche scientifique - et non comme un "art" se pratiquant en aval de la recherche - conditionnera l'implication effective des chercheurs dans de telles approches. Nous nous interrogeons enfin sur la contribution de cette réflexion à celle, déjà ancienne, sur l'élaboration d'une véritable "technologie", considérée comme un "discours épistémologique" sur les techniques et les pratiques.

La notion d'intégration n'est pas nouvelle dans les sciences agronomiques - le terme de lutte intégrée remonte aux années cinquante - mais semble, sous différentes déclinaisons - démarche intégrée, approches ou disciplines intégratives - connaître actuellement un regain d'intérêt, voire être présentée comme une source de progrès majeure pour l'avenir.

Après avoir proposé une définition générale de cette notion d'intégration et énoncé ses enjeux, nous examinerons différentes situations concrètes où cette question se pose. Nous tenterons ensuite de formuler quelques questions générales que soulève cette démarche, afin de proposer les éléments d'une problématique et une réponse à la question : l'intégration est-elle un "art", c'est-à-dire une pratique subjective et intuitive réservée à quelques "virtuosos" et difficilement transmissible, ou une "science", à savoir une démarche structurée, explicite, critiquable et enseignable ?



Définitions et enjeux

■ Définitions

On peut proposer trois définitions - ou plutôt trois approches - complémentaires de la notion d'intégration, l'une étant du registre de la connaissance et de l'analyse, la seconde du registre de l'action et de la synthèse et la dernière reliée au sens mathématique de ce terme.

Dans le registre de la connaissance, on définira l'intégration comme la prise en compte du caractère intégré de nombreux "objets" de la recherche agronomique, c'est-à-dire de la nécessité de ne pas les étudier seulement en les décomposant en entités plus simples pouvant être décrites indépendamment, parfois par des disciplines différentes. Cette attitude "holistique" - également souvent qualifiée de "systémique" - s'oppose donc à celle, "réductionniste", qui, souvent, simplifie les objets pour n'en étudier que certains aspects considérés comme seuls pertinents et explicatifs du fonctionnement de l'ensemble. Sans développer davantage ce point, nous soulignerons la nécessité de distinguer un réductionnisme "pragmatique", à savoir l'intérêt - qui nous semble très souvent légitime - d'étudier les composantes d'un objet pour mieux le comprendre, et le réductionnisme "idéologique", qui verrait dans cette seule décomposition la clé de la compréhension de cet objet.

Dans le registre de l'action, on peut définir l'intégration comme une démarche visant à associer des composantes et à les faire interagir dans un ensemble ayant des propriétés "émergentes", c'est-à-dire des propriétés différentes de celles que l'on pourrait attendre de la simple addition des propriétés de ces différentes composantes. L'exemple le plus classique est celui d'un avion, qui acquiert la propriété de voler alors qu'aucune de ses composantes n'en est capable. Indiquons d'emblée que cette notion d'émergence n'est pas nécessairement liée à un système complexe ayant de nombreuses composantes : les molécules d'eau ont incontestablement des propriétés originales et émergentes par rapport à l'oxygène et à l'hydrogène, comme le fait de former un liquide à température ambiante et d'avoir une densité maximale à 4°C, ce qu'aucune étude fine de ces deux éléments ne permet de prédire.

Pour ces deux premiers registres, l'intégration peut concerner non seulement des objets et des techniques mais également des critères et des objectifs. Ainsi, le passage d'une approche centrée sur la rentabilité microéconomique des productions agricoles à une approche "multifonctionnelle", prenant en compte les externalités positives ou négatives, environnementales ou sociales, de ces productions relève à l'évidence de cette préoccupation d'intégration.

Enfin, on a parfois une utilisation du terme qui évoque le concept mathématique de calcul intégral - c'est-à-dire de cumulation dans le temps ou l'espace de multiples effets élémentaires dont on veut estimer l'impact global - mais qui s'en distingue en fait assez nettement. On peut, en effet, avoir parfois, comme en calcul intégral, des effets additifs, comme lorsque l'on considère

le débit d'un fleuve comme intégrant la pluviométrie sur l'ensemble du bassin versant. Mais, le plus souvent, la notion d'intégration suppose que ces effets élémentaires ne s'additionnent pas simplement, et que des interactions complexes peuvent conduire à des effets globaux inattendus. C'est par exemple le cas lorsque l'on parle d'espèce intégratrice en écotoxicologie, susceptible de révéler les effets conjoints de nombreuses molécules chimiques présentes à faible dose dans un écosystème.

■ De nouveaux enjeux ?

Pourquoi considérer que l'intégration constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la recherche agronomique ? On peut tout d'abord souligner que cette préoccupation renoue, de fait, avec l'ambition fondatrice de l'agronomie (au sens large utilisé en français) en tant que discipline scientifique [1]. En effet, le champ cultivé ou la population animale d'élevage, en tant qu'agro-systèmes, sont des objets originaux, à la fois "écosystèmes" et "socio-systèmes", et l'agronomie se donne comme objectif d'intégrer ces deux dimensions. Il convient donc d'appréhender à la fois le fonctionnement physique, biologique et écologique d'un écosystème "modifié" et les pratiques des acteurs, insérés dans une société qui apporte non seulement des savoirs, mais aussi des représentations culturelles particulières de la nature et de l'homme.

Ce paradigme fondateur est aujourd'hui conforté par deux groupes de raisons complémentaires. Le premier est lié à la dynamique interne des sciences, c'est-à-dire à l'apparition de nouvelles méthodes, de nouveaux outils, voire même de nouvelles disciplines qui permettent d'étudier les objets "classiques" de la recherche agronomique sous un jour nouveau, d'en révéler de nouvelles dimensions à partir de connaissances générées à des niveaux d'organisation inférieurs [2]. On peut citer l'exemple des apports de la biologie moléculaire à l'étude des sols et de la rhizosphère (compréhension des interactions entre les microorganismes et le système racinaire, échanges d'éléments nutritifs entre plantes, ...), qui interrogent l'agronomie sur sa capacité à prendre en compte cette nouvelle vision de la structure et de la dynamique de la biocénose souterraine.

Ce progrès des sciences conduit à chercher des outils permettant d'intégrer ces nouvelles informations, pour vérifier par exemple s'il est possible de rendre compte ou, au moins, de mieux comprendre des phénomènes macroscopiques (par exemple la morphogénèse d'un système racinaire) à partir des connaissances acquises à des niveaux d'organisation microscopiques, d'ordre cellulaire ou moléculaire. Par rapport à cette préoccupation, les progrès des sciences de l'information (modélisation, simulation, représentation experte des connaissances) permettent aujourd'hui - et invitent même à - l'exploration du comportement de systèmes complexes à partir de connaissances plus ou moins élaborées sur des composantes ou des processus. La modélisation de la morphogénèse des plantes ou de la propagation d'agents pathogènes dans des milieux hétérogènes en sont des exemples et l'on voit se développer de nombreux projets de

[1] Doré T., Le Bail M., Martin P., Ney B., 2006. *L'agronomie aujourd'hui*. Éditions Quæ, 367p.

[2] EPSO, 2005. European plant science : a field of opportunities. *J. Exp. Bot.* 56: 1699-1709.



représentation numérique globale d'objets agronomiques : fruit numérique (encadré ①), sol numérique... Ces approches révèlent parfois des phénomènes insoupçonnés : ainsi, on a pu montrer qu'un changement *a priori* minime de l'apport de sucres vers un fruit pouvait avoir des conséquences importantes sur l'accumulation de carbone et d'eau dans ce fruit et sur sa teneur en sucres.

Autre aspect lié à la dynamique des sciences, le caractère non prévisible du comportement de certains systèmes, qualifiés globalement de non-linéaires, à partir d'une connaissance quasi parfaite de leurs composantes et de leurs processus élémentaires est admis depuis de nombreuses années par les physiciens, et a été popularisé par des métaphores comme celle du battement de l'aile du papillon déclenchant, à distance et plus tard, un cyclone. La nécessité de compléter les approches analytiques par des démarches étudiant directement ces niveaux intégrés auxquels les phénomènes s'observent est donc maintenant reconnue et rompt avec une vision réductionniste très dominante au vingtième siècle.

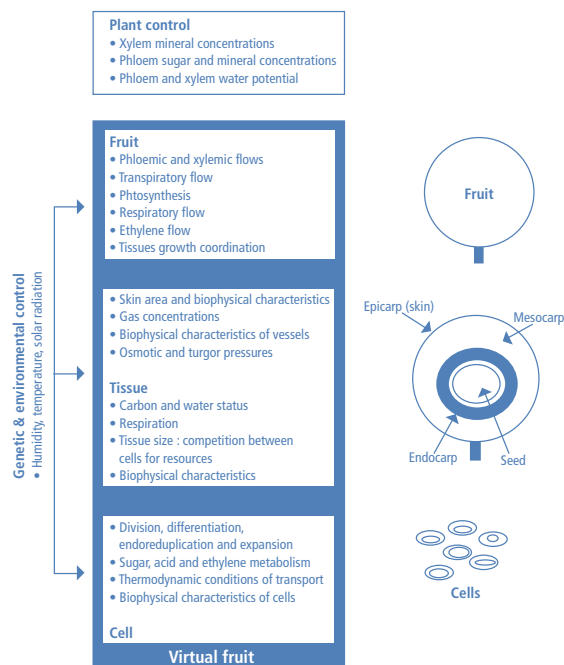
Cette idée a pénétré peu à peu les sciences biologiques, même si le fait que des phénomènes importants - comme l'extension inattendue de l'épizootie actuelle de fièvre catarrhale ovine en Europe du Nord et de l'Ouest - ne puissent être reliés à des causes décelables, continuent à heurter l'intuition de nombreux scientifiques. On touche en effet à un débat épistémologique central sur l'usage pertinent du principe de parcimonie : dès lors qu'un phénomène peut être "expliqué", ou au moins "représenté" par le simple jeu d'effets aléatoires, l'introduction d'une hypothèse complémentaire sur une "cause" sous-jacente doit, en toute rigueur, être qualifiée de superflue. C'est par exemple le cas des débats autour des modèles neutralistes en génétique des populations, qui rendent compte de certaines évolutions sans introduire la sélection naturelle, ou des modèles chaotiques en démographie, qui "expliquent" les fluctuations importantes de populations de rongeurs sans faire appel à des changements de l'environnement.

Le second groupe de raisons est plutôt lié aux sollicitations externes vis-à-vis de la recherche agronomique, c'est-à-dire aux demandes de "prise en compte" de nouvelles questions ou d'aspects méconnus de ses objets familiers, voire à l'émergence de nouveaux "objets", comme, par exemple, le paysage, et de nouvelles démarches, telles que la conception basée sur l'écologie du paysage [3]. Ainsi, les changements globaux qui s'annoncent demandent de pouvoir prédire quantitativement leurs conséquences, ce qui suppose l'intégration de connaissances parfois qualitatives dans des modèles de simulation. Dans un autre domaine, le fait que de nombreux acteurs, souvent non agriculteurs, aient aujourd'hui une influence majeure sur le devenir des espaces ruraux oblige les chercheurs s'intéressant à la dynamique de ces territoires à étudier et à comprendre les attentes, les motivations mais aussi le mode d'influence de ces nouveaux acteurs et la manière dont ces acteurs conduisent *in fine* à telle ou telle modification des territoires.

[3] Nassauer J.L., Opdam P., 2008. Design in science: extending the landscape ecology paradigm. *Landscape Ecol* 23: 633-644.

Encadré 1 Le fruit, un système intégré, Michel Génard, Inra

Représentation schématique de l'organisation du fruit selon trois niveaux hiérarchiques. Pour chaque niveau, les contraintes sur le niveau inférieur sont données dans la partie inférieure de la boîte et des conditions nécessaires au niveau supérieur sont données dans la partie supérieure de la boîte. Les contrôles par la plante, le génome, l'environnement sont également indiqués.



Le fruit peut être étudié à trois niveaux principaux. Au plus haut niveau, il peut être considéré comme une entité qui échange des ressources (minéraux, sucres et eau) avec la plante via le phloème et le xylème, et des gaz (vapeur d'eau, CO₂, O₂, et éthylène) avec l'atmosphère par la peau. À un niveau intermédiaire, les tissus peuvent être traités en tant que compartiments séparés, chaque tissu ayant des caractéristiques spécifiques en termes de croissance et de métabolisme. Au niveau le plus bas, le fruit se compose de cellules sujettes à différents processus tels que la division, la différenciation et l'expansion cellulaire, les transformations métaboliques et le stockage vacuolaire.

Dans une approche hiérarchique, le rapport entre deux niveaux est asymétrique : le niveau N exerce des contraintes sur le niveau N-1, tandis que le

niveau N-1 fournit les informations nécessaires au niveau N. Par exemple, au niveau tissulaire (N), les caractéristiques biophysiques d'un tissu, son statut carboné et hydrique, sa respiration, son nombre de cellules pilotent la croissance et le métabolisme au niveau des cellules (N-1). La surface et les caractéristiques biophysiques de la peau et les concentrations en gaz dans les tissus déterminent les échanges de gaz du fruit (N+1) avec l'atmosphère.

Dans un système hiérarchique, l'information passe entre les différents niveaux. Par exemple, de l'échelle de la cellule à celle du fruit, la division régit le nombre des cellules dans les tissus. Le nombre de cellules et la force de puits des cellules gouvernent la force de puits du tissu qui est un facteur important du flux phloémien entrant dans le fruit.

Référence : Génard M., Bertin N., Borel C., Bussièrès P., Gautier H., Habib R., Léchaudel M., Lecomte A., Lescouret F., Lobit P., Quilot B. 2007. Towards a virtual fruit focusing on quality: modelling features and potential uses. *Journal of Experimental Botany*, 58, 917-928.

On peut avoir d'ailleurs une conjonction de ces deux sollicitations interne et externe. Ainsi, la nécessité pour l'agronomie de prendre désormais en compte non seulement les produits marchands mais l'ensemble des impacts et des services assurés par les agro-écosystèmes résulte à la fois des progrès de l'écologie - qui a pu révéler l'importance de ces services et leur caractère vulnérable - et de la pression de l'opinion publique exprimant de nouvelles attentes vis-à-vis de l'agriculture.



Quelques chantiers concrets

Sans prétendre ni à un inventaire exhaustif, ni à une véritable typologie des situations, nous présenterons trois types de “chantiers” où la recherche agronomique se confronte concrètement à la question de l’intégration.

■ L’intégration des échelles spatio-temporelles

Si l’écologie, dans sa tradition holiste, a depuis longtemps abordé le fonctionnement des écosystèmes à des niveaux et des échelles variés [4], l’agronomie se doit aujourd’hui également d’étudier les phénomènes et de décliner son action à différentes échelles spatiales emboîtées pour comprendre et améliorer la résilience des agrosystèmes. Ainsi, la protection intégrée des cultures amène à combiner des processus très locaux au niveau de la plante (gènes de résistance, architecture) ou de son microenvironnement (physico-chimie et biocénose du sol, microclimat de la canopée), des processus à l’échelle de la parcelle (structure du peuplement végétal, avec éventuellement des mélanges de variétés ou d’espèces), d’autres à l’échelle des paysages (aménagements écologiques régulant les populations d’auxiliaires ou de bioagresseurs), ou enfin à des échelles plus vastes, comme la surveillance de la progression d’espèces invasives. Aucun de ces niveaux d’action ne peut à lui seul assurer une protection totale et durable des cultures et il faut donc les combiner de manière pertinente pour obtenir ce résultat : c’est ce que nous qualifions, en nous inspirant du vocabulaire militaire, “d’innovation en profondeur”.

On retrouve une problématique similaire au niveau des échelles temporelles. En effet, il apparaît de plus en plus clairement que les propriétés fonctionnelles d’un agrosystème à un moment donné résultent en grande partie de son histoire, cette histoire combinant des phénomènes très lents (comme la genèse des sols ou l’évolution des génomes des plantes), des phénomènes à l’échelle décennale (comme la dynamique de la matière organique des sols), annuelle (effet des cultures antérieures ou des intercultures sur la flore du sol) et d’autres à pas de temps très court (dynamique d’une épidémie de mildiou ou d’une prolifération de pucerons). Il est donc nécessaire de comprendre les interactions entre ces différentes échelles temporelles, en particulier en quoi des processus rapides, généralement les plus spectaculaires, peuvent être modulés par des phénomènes se déroulant sur des pas de temps plus lents.

Ainsi, l’étude des invasions biologiques montre souvent que la phase d’invasion est précédée d’une phase de latence pouvant s’étendre sur de longues années et que les phénomènes qui se déroulent au cours de cette phase de latence - évolutions génétiques ? modifications de l’environnement ? - sont très mal connus. Intervenir lors de la phase “explosive” de l’invasion oblige à des stratégies de défense “curative”, souvent coûteuses et peu efficaces, alors qu’un contrôle “prophylactique” de la phase de latence pourrait se révéler fructueux. De même, l’épidémie majeure de fièvre de la vallée du Rift - arbovirose des ruminants transmissible à l’homme - qui

[4] Holling C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and systems*, 4, 1-24.
 Odum E.P., 1997. *Ecology: a bridge between science and society*. Sinauer Associates Inc. Publisher., Sunderland, USA, 323p.

a touché la vallée du fleuve Sénégal en 1987 a-t-elle été précédée d'une intensification progressive de la circulation virale qui s'est déroulée sur plusieurs années, sans manifestation évidente dans le contexte sanitaire local. Le déclenchement d'une alerte pendant cette phase d'amplification, et la mise en œuvre d'une campagne de vaccination du bétail à l'échelle de la sous-région, auraient sans doute permis d'éviter plusieurs centaines de décès humains, des dizaines de milliers de malades et de lourdes pertes économiques pour les éleveurs.

Nous ferons trois remarques complémentaires sur cette question de l'intégration des échelles spatio-temporelles. La première est que le changement d'échelle n'est pas un simple "zoom" à effectuer dans un espace-temps homogène, à l'image des questions qui se posent en dynamique des fluides lorsque l'on veut utiliser des maquettes (on sait que, même dans ce cas, les équations de changement d'échelles sont parfois complexes). L'espace-temps agronomique n'est pas "fractal", chaque échelle a des propriétés particulières, met en œuvre des processus différents, et il s'agit donc beaucoup plus d'intégrer des niveaux d'organisation ou des niveaux hiérarchiques que des échelles au sens strict du terme.

La seconde remarque est que cette possibilité d'appréhender des échelles d'espace et de temps variées conduit à pouvoir utiliser l'hétérogénéité comme une variable d'action. Cette approche peut apparaître comme antagoniste d'une vision classique de l'agronomie - au moins celle des grandes cultures annuelles et des élevages hors sol - qui s'est souvent attachée, *via* des pratiques souvent coûteuses en énergie, à uniformiser l'espace et à rendre les situations répétables dans le temps. L'agronomie, dans une logique proche de celle de l'industrie, a en effet longtemps eu pour objectif unique de maximiser une simple fonction de production (le rendement, le profit), mettant au point un ensemble de techniques largement transférables dans des conditions environnementales et socioéconomiques variées pour atteindre cet objectif.

La recherche de nouveaux objectifs visant en particulier à limiter les impacts négatifs de l'agriculture intensive sur l'environnement (limitation des pertes chimiques, des pertes de biodiversité), et la complexité de cahiers des charges qui en découlent à des échelles variées, ont conduit à revoir largement les démarches consistant à simplifier le système pour le maximiser. Les solutions reposent aujourd'hui beaucoup plus sur une compréhension fine des processus et des interactions et régulations biologiques à l'œuvre dans les agrosystèmes, mobilisant ainsi les démarches et les outils de l'écologie [5]. Ainsi, en s'appuyant sur l'écologie des perturbations, on peut imaginer jouer sur des "régimes de perturbations temporelles" pour réguler une population de ravageurs - comme dans le cas du contrôle des séquences d'assèchement et d'inondation des gîtes larvaires de moustique en Camargue -, conserver la biodiversité ou améliorer la résistance d'une prairie à la sécheresse, mais cela s'oppose à une vision cherchant à définir et maintenir des conditions optimales. Il en est de même au niveau spatial lorsque l'on envisage des peuplements végétaux composites plutôt que la monoculture d'un génotype "idéal".

[5] Chevassus-Au-Louis B., Griffon M., 2008. La nouvelle modernité : une agriculture productive à haute valeur écologique. DEMETER 2008, 7-48, Ed Club DEMETER, Paris. Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2008. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for sustainable development*. DOI: 10.1051/agro:2007057.



Enfin, les nouveaux défis auxquels est confrontée la planète dans son ensemble obligent à une intégration de niveaux hiérarchiques de plus en plus grands : la conservation de la biodiversité questionne les pratiques agricoles et leur agencement à l'échelle de la biosphère et la question du changement climatique oblige à replacer les pratiques de culture et d'élevage par rapport à leurs impacts (et leur capacité de mitigation) sur l'atmosphère. L'agriculture est susceptible de séquestrer du carbone ou de produire des flux de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux, ...) de la biosphère vers l'atmosphère. Les termes du bilan sont complexes et obligent à une analyse des processus à plusieurs échelles : l'agronomie, science du local, se doit de devenir également science du global.

■ L'intégration des disciplines

Pour répondre à ses nouveaux défis, la recherche agronomique est amenée à la fois à faire davantage interagir ses disciplines "traditionnelles" et à mobiliser de nouvelles disciplines jusque là peu représentées [6], qu'il s'agisse de l'écologie, de la géographie, des sciences de l'information, du droit ou des sciences politiques. Cette intégration peut concerner un ensemble de disciplines proches ou impliquer à la fois des disciplines biophysiques, biotechniques et "sociétales". Donnons quelques exemples pour illustrer ces différents aspects :

- l'écotoxicologie des milieux aquatiques impose de coupler, d'une part, des approches physico-chimiques permettant d'établir, à partir d'une connaissance de l'utilisation des produits phytosanitaires par les agriculteurs, une chronique temporelle des arrivées, puis de la spéciation et de la dynamique de ces produits ou de leurs métabolites dans les milieux naturels et, d'autre part, des études en mésocosmes permettant de tester la réponse d'écosystèmes simplifiés à ces apports ;
- l'évolution des comportements alimentaires amène à mobiliser les approches de l'économie, de la sociologie et de l'anthropologie pour comprendre des phénomènes comme le développement très inégalement réparti de l'obésité infantile. En effet, les analyses économiques peinent par exemple à expliquer l'existence de cas de surpoids et de cas de sous-nutrition au sein d'une même famille, et seulement dans certaines populations ;
- la compréhension des processus de rejets d'innovations, comme les OGM ou l'irradiation des aliments, impose de faire interagir les sciences biotechniques à l'origine de ces innovations et les sciences sociétales susceptibles d'explicitier les déterminants de ces refus ;
- la lutte anti-vectorielle contre les trypanosomiasés africaines humaines et animales oblige à combiner une connaissance fine de la biologie et de l'écologie des glossines, pour rechercher des mesures de contrôle efficaces et respectueuses de l'environnement, et une approche sociale et économique, pour faciliter l'appropriation des méthodes de contrôle par les gestionnaires du risque et les groupes exposés à ce risque ;
- le domaine de l'aide à la décision en agriculture (pour l'évaluation, le pilotage ou la gestion) a bénéficié ces dernières années, et va très certainement encore bénéficier, des apports des mathématiques et des progrès récents et continus des sciences de l'informatique et des tech-

[6] Tadmor B., Tidor B., 2005. Interdisciplinary research and education at the biology-engineering-computer science interface: a perspective. *DDT* 10, 1183-1189.

nologies de l'information, qui fournissent de nouveaux outils de modélisation de plus en plus performants pour aborder la complexité des agrosystèmes [7].

La question générale du dialogue entre disciplines et des difficultés des approches interdisciplinaires fait l'objet d'une abondante littérature [6] et nous nous limiterons ici à évoquer deux aspects qui nous semblent plus spécifiques de la recherche agronomique.

Le premier est celui du non-recouvrement des espaces d'étude et d'action des différentes disciplines. Pour prendre l'exemple de la ressource en eau, l'espace pertinent pour un hydrologue sera le bassin versant, entité intégratrice de l'ensemble des flux. L'hydrobiologiste étudiant la structure des peuplements aquatiques pourra être amené à considérer les grandes provinces biogéographiques, qui regroupent souvent plusieurs bassins versants, mais aussi à scinder un bassin versant en plusieurs entités écologiquement différenciées. Les sciences économiques et sociales prendront comme ensemble d'étude le collectif des acteurs impliqués dans la production et l'utilisation de l'eau, qui peuvent être répartis sur un vaste territoire, avec parfois des interactions au niveau international. L'existence de ces différentes échelles et niveaux d'organisation se traduit par exemple par la difficulté à mettre en place des enquêtes ou des bases de données pluridisciplinaires ou de développer des modèles communs.

Le second aspect est l'émergence de plus en plus fréquente dans le champ de la recherche agronomique d'objets "hybrides" - au sens de Bruno Latour [8] -, à savoir des objets qui sont un mélange complexe d'aspects techniques et d'aspects sociétaux et qui doivent être étudiés comme tels. Nous avons cité le cas des OGM, pour lesquels il apparaît assez clairement qu'une partie importante du débat ne porte pas sur les éventuelles imperfections techniques de ces inventions mais sur les conséquences économiques et sociétales de leur diffusion éventuelle. Il en résulte, notamment, que ce n'est pas le perfectionnement technique de ces produits (les OGM de 2^{ème} ou 3^{ème} génération) qui changera notablement les termes du débat [9].

Un autre exemple a été la mise en place en France de la directive européenne Natura 2000, qui visait à désigner des territoires d'intérêt écologique et s'est accompagnée de vives oppositions des agriculteurs dans de nombreuses régions. Nous considérons que ces tensions sont liées en grande partie au fait d'avoir considéré cette opération essentiellement sous l'angle du génie écologique, et d'avoir sous-estimé de ce fait la nécessité de développer en même temps un "génie sociétal" adapté à l'appropriation de ce nouvel objet par les acteurs des territoires concernés. On retrouvera certainement la même question dans le cas de la mise en place de la "trame verte et bleue" envisagée par le Grenelle de l'Environnement et l'on ne peut qu'espérer que les leçons de l'expérience Natura 2000 auront été tirées.

Enfin, le rapprochement observé de disciplines pour répondre à de nouveaux défis, tel qu'il est illustré ci-dessus, peut contribuer à l'émergence de nouvelles disciplines, fruit de cette problématique de rapprochement et d'interaction, débouchant ainsi sur une intégration durable des disci-

[7] Malézieux E., Trébuil G., Jaeger M.(eds), 2001. *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Collection Repères, édition Inra-Cirad, 446 p.

[8] Latour B., 1995. *Sociologie des sciences, analyse des risques collectifs et situations de crise*. Actes du séminaire du GIS "Risques collectifs et situations de crise", séance du 15 novembre 1994, 107-111, Éd. CNRS, Paris.

[9] Chevassus-Au-Louis B., 2007. *L'analyse des risques. L'expert, le décideur et le citoyen*. Collection Sciences en Questions. Éd. Quæ, Paris, 96 p.



plines d'origine : c'est le cas par exemple de l'agroécologie, qui se propose de combiner agronomie et écologie, et, pour certains auteurs, des éléments d'économie et de sociologie, pour répondre aux enjeux de durabilité écologique, économique et sociale des agrosystèmes (encadré ②).

■ L'intégration des acteurs, des pratiques et des usages

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les objets de la recherche agronomique apparaissent de plus en plus "investis" par des acteurs nombreux qui vont exprimer, en tant que consommateurs, citoyens ou contribuables, des attentes nouvelles. Ainsi, les évolutions des sols, de la biodiversité, des zones humides, des paysages sont considérées aujourd'hui comme ne pouvant être la simple résultante de logiques micro-économiques indépendantes des propriétaires ou des utilisateurs de ces ressources. Les demandes de signes de qualité, de développement de systèmes alimentaires localisés (encadré ③), d'information sur les conditions de production (bien-être animal, certifications environnementales, ...) manifestent également cet élargissement du cercle des "porteurs d'enjeux" et des attentes associées.

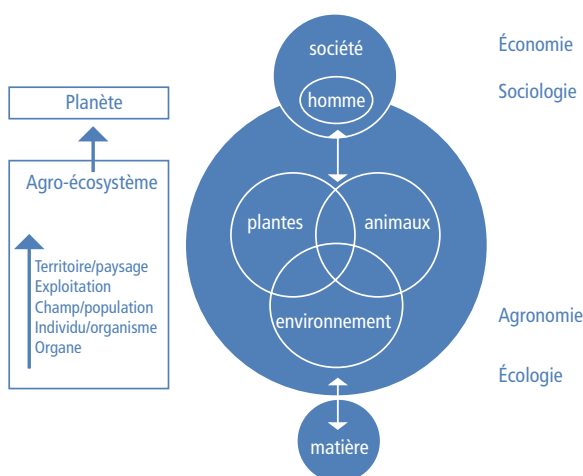
Cet élargissement peut avoir une portée et une action locale (la défense d'un patrimoine régional) mais elle peut être également largement mondialisée. À titre d'exemple, il est ainsi possible que la volonté par les consommateurs européens ou nord-américains d'une labellisation ou certification "bio" ou "éthique" pour un produit comme le chocolat ait un réel impact sur la conservation de la biodiversité dans le corridor méso-américain, un des lieux de production du cacao, à travers le maintien de pratiques agroforestières pour la culture du cacaoyer qui permettent la conservation d'un habitat favorable à de nombreuses espèces animales menacées. Cependant, faire participer ces nouveaux acteurs suppose l'élargissement d'un certain nombre de cercles qui, même s'il apparaît positif à long terme, ne va pas sans difficulté. Par exemple, associer des citoyens à la définition des objectifs et des méthodes d'amélioration génétique d'une race animale peut permettre d'améliorer la perception sociale de ces pratiques mais pourra heurter le cercle des éleveurs et des techniciens responsables de l'évolution de "leur" race.

La recherche agronomique a une certaine expérience de l'intégration des acteurs mais cette expérience concerne essentiellement la mise en place de filières de production, associant dans une logique économique tout ou partie des opérateurs de la production, de la transformation et de la distribution des produits et des services associés. Même s'il peut exister des conflits entre ces opérateurs, on peut considérer qu'ils partagent tous une même finalité, à savoir d'alimenter le marché avec des produits présentant un rapport qualité/prix attractif pour les acheteurs et rémunérateur pour les vendeurs.

Par contre, l'analyse des "filières de pollution", c'est-à-dire de la chaîne reliant l'ensemble des acteurs aboutissant à la production d'une externalité négative, est moins classique et révèle des situations complexes. On peut citer par exemple le développement d'espèces invasives sur un territoire, qui associe *de facto* des transporteurs, des marchands de containers, des jardinerie,

Encadré ② L'agroécologie, une discipline intégratrice qui vise au développement d'agrosystèmes plus durables, Eric Malézieux, Cirad

L'agroécologie se définit comme une discipline intégratrice qui inclut des éléments des disciplines de l'agronomie, de l'écologie, mais aussi de l'économie et de la sociologie. Elle vise à "l'étude des interactions entre les plantes, les animaux, les hommes et l'environnement au sein des agrosystèmes" [1]. À l'origine fondée sur la volonté d'application de l'écologie à l'agriculture [2], elle s'est progressivement élargie au champ des sciences humaines, dans la perspective de mieux répondre aux enjeux de la durabilité de l'agriculture mondiale et en particulier à la gestion des ressources naturelles par les paysans pauvres de la planète [3].



Les contours et le positionnement de la discipline font ainsi encore débat aujourd'hui, même si des départements d'université et des laboratoires de recherche sur l'agroécologie existent aux États-Unis et en Europe. En proposant de travailler au-delà des frontières des disciplines établies, l'agroécologie espère proposer des avancées et des questionnements renouvelés, et surtout des solutions plus globales aux grands enjeux de la gestion des ressources naturelles dans les agrosystèmes, basées sur une approche holistique.

Les pratiques agroécologiques visent à optimiser un certain nombre de fonctions dans les agrosystèmes, en s'inspirant du fonctionnement des écosystèmes naturels (cycles biogéochimiques, activité biologique des sols, complexité des structures biologiques, ...), en particulier en construisant des systèmes multi-spécifiques, aux propriétés de résilience potentiellement accrues [4].

chimiques, activité biologique des sols, complexité des structures biologiques, ...), en particulier en construisant des systèmes multi-spécifiques, aux propriétés de résilience potentiellement accrues [4].

Le champ de l'agroécologie [1]. Disciplines (à droite) et niveaux d'organisation (à gauche). Si le champ cultivé et l'exploitation agricole constituent les niveaux d'organisation privilégiés de l'agroécologie, les changements d'échelles infra et supra font l'objet de questionnements et méthodes spécifiques.

[1] Dalgaard T., Hutchings N.J., Porter J.P., 2003. Agroecology, scaling and interdisciplinarity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 100, 39-51.

[2] Gliessman S.R., 1998. *Agroecology: Ecological Process in Sustainable Agriculture*. Ann Harbor Press.

[3] Altieri M.A., 2002. Agroecology: the science of natural resources management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93, 1-24.

[4] Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2008. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for sustainable development*. DOI: 10.1051/agro:2007057

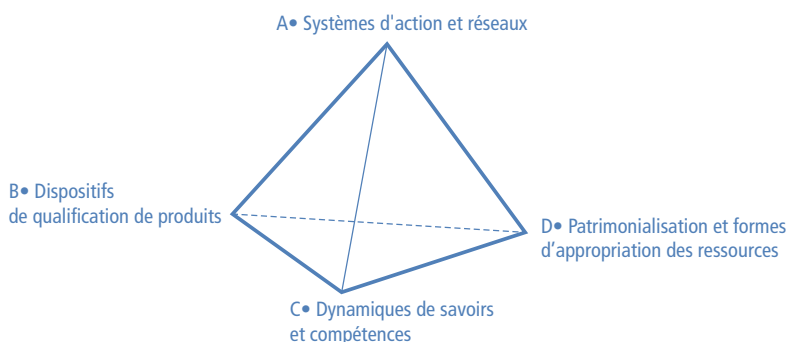
des amateurs alors qu'aucun de ces opérateurs n'a la volonté délibérée d'introduire de telles espèces. C'est pourtant à travers l'organisation de cette "filrière" que peut se réaliser la maîtrise des invasions biologiques sur un territoire donné. Dans le même esprit, le développement des analyses de cycle de vie (ACV), qui examinent en particulier les impacts environnementaux d'un produit, depuis sa conception jusqu'à son élimination, permet de reconsidérer des bilans basés uniquement sur le "segment" le plus visible du cycle de vie, comme dans le cas du bilan énergétique des agrocarburants ou de divers modes de production et de distribution alimentaires.



Encadré ☉ Les Systèmes agroalimentaires localisés (Syal) : un objet de recherche intégrateur, José Muchnik, Inra

La notion de Syal est apparue il y a une dizaine d'années et a connu ensuite une importante diffusion dans la communauté scientifique nationale et internationale. Un réseau d'institutions de recherche et d'enseignement latino-américain en 2006, et un Groupe de recherche européen (GDRE) en 2008, ont été constitués autour de cet objet de recherche. L'émergence de cette notion est associée à : 1. l'évolution des enjeux que doit relever la production agricole, tant sur le plan environnemental, socio-économique que sur celui de l'alimentation des populations 2. les limites de la notion de filière, liée à une vision relativement linéaire de l'organisation des activités agroalimentaires 3. la référence au territoire comme élément central, notion considérée tant d'un point de vue biophysique (facteurs édaphiques, géologiques, paysages...) que d'un point de vue culturel (espace construit socialement, référence identitaire des hommes habitant cet espace).

Les Syal concernent une grande diversité de situations, depuis des produits destinés aux marchés locaux jusqu'à des produits destinés à l'exportation, des productions enracinées dans l'histoire ou des productions relativement récentes. Pour structurer la production des connaissances sur les Syal, nous avons délimité quatre familles d'objets : ce sont les interactions entre ces objets qui permettront de comprendre la diversité des systèmes agroalimentaires en présence, leur émergence, leur stabilité ou les crises qui les traversent (figure).



L'intérêt de l'approche SYAL est de rendre compte des différentes articulations et niveaux d'intégration.

Intégration des acteurs, des pratiques et des usages : intégration de la production et de la consommation : la relation entre les identités alimentaires, les dispositifs de qualification des produits (IG, AOC...) les techniques productives et la reproduction de la biodiversité n'en est qu'un exemple. Intégration d'activités différentes, c'est le territoire et non le produit qui délimite le Syal, la prise en compte de différents secteurs d'activités territoriales ainsi que d'autres usages des territoires ruraux (touristiques, culturels...) devient donc une des finalités de cette approche.

Intégration des échelles spatio-temporelles : le territoire d'un Syal n'est pas un espace continu, mais un espace d'appartenance qui permet d'articuler des activités réalisées souvent dans des espaces éloignés du point de vue physique. Dynamiques rurales, urbaines et périurbaines peuvent alors être intégrées à travers cette approche. Nous devons également intégrer des échelles temporelles différentes, tant de manière diachronique car nous sommes souvent face à une localisation de ressources construites dans la durée qui sont soumises à des contraintes et des processus d'innovation dans un temps court, que de manière synchrone, car les différentes activités regroupées dans un Syal ont des pas de temps différents.

Intégration des disciplines : dans la mesure où l'ancrage territorial des activités dépend d'une combinaison de variables matérielles (sols, climat, caractéristiques des produits...) et immatérielles (savoir-faire, compétences, institutions...) l'étude des Syal exige une intégration entre sciences biotechniques et sciences sociales, précisons que cette interdisciplinarité n'est pas une "entrée" mais le résultat d'un processus de recherche, l'existence d'un objet commun étant l'une des conditions pour mener à bien ce processus.

Citons à titre d'exemple le Syal fromager de Cajamarca au Pérou (Boucher, 2004), qui montre bien ces différents niveaux d'intégration. En effet plusieurs ressources territoriales spécifiques caractérisent cette production : 1. le climat et les sols des zones d'altitude de la région, avec des pâturages de qualité et des vaches de race créole bien adaptées, produisent peu de lait (de 4 à 5 l par jour), mais riche en matières grasses (taux de matière grasse 4,2% à 4,5%) ; 2. les savoir-faire constitués dans la durée, en particulier pour le fromage "mantecoso", élaboré en ville à partir d'un caillé ("quesillo") fermier ; 3. les paysages, valeur naturelle et symbolique, image et attrait touristique de la région.

Aujourd'hui dans un monde agroalimentaire mis en tension par la volatilité des prix, la restructuration des marchés et les processus de localisation/délocalisation des activités productives, la question centrale qui se pose à l'approche Syal est l'ancrage territorial des activités productives : dans quelle mesure les Syal peuvent-ils conférer plus de résistance pour amortir les chocs de cette évolution, et plus de résilience pour s'adapter et relancer des dynamiques territoriales à partir de la mise en valeur de ressources locales ?

Références :

- Bérard L., Marchenay Ph, 2006. Biodiversité culturelle, productions localisées et indications géographiques, 3^{ème} Congrès international du réseau SYAL "Alimentation et Territoires" Baeza Espagne, 18-21 octobre 2006.
- Boucher F., 2004. Enjeux et difficultés d'une stratégie collective d'activation des concentrations d'agro-industries rurales. Thèse de doctorat UVSQ, CD ed. Cirad, Montpellier.
- Lacombe Ph., Muchnik J., 2007. L'essor des systèmes agroalimentaires localisés, La recherche 406 : 18-19.
- Muchnik J., Requier-Desjardins D., Sautier D., Touzard J.M., 2007. Systèmes Agroalimentaires Localisés, *Économies et Sociétés* 29 : 1465-1484.
- Muchnik J., Sautier D., 1998. Systèmes agro-alimentaires localisés et construction de territoires. ATP Cirad, 46 p.
- Requier-Desjardins D., Boucher F. Cerdan C., 2003. Globalization, competitive advantages and the evolution of production systems : rural food processing and localized agri-food systems in Latin-American countries. *Entrepreneurship and regional development*, n°15, pp. 49-67.

Autre cas, l'utilisation d'une même ressource (un plan d'eau, une forêt, une lande) par des utilisateurs variés (agriculteurs, pêcheurs ou chasseurs, touristes et sportifs, sylviculteurs, aquaculteurs) ayant des attentes différentes et parfois antagonistes est une question déjà ancienne, mais qui devrait se poser avec une acuité croissante dans de nombreux lieux où se combinent ressources attractives et croissances démographiques (zones littorales, grands lacs de barrages, zones rurales périurbaines). L'intégration de ces différentes attentes, confrontées aux impératifs de gestion durable de ces ressources et des risques associés, appelle l'élaboration de nouveaux outils qui, sans éliminer la dimension politique de ces arbitrages, permettra de les éclairer.

Enfin, la question de l'intégration de nouveaux acteurs investit aujourd'hui la pratique même de la recherche agronomique, dès lors qu'est mise en avant dans de nombreux contextes l'importance des "savoirs profanes", en particulier vis-à-vis d'objets ou de processus naturels, et les capacités d'innovation endogène liées à ces savoirs. Élaborer de nouveaux modes de recherche associant les savoirs "experts" et les savoirs "profanes" - ou, plutôt, les "modes de connais-



sance et d'innovation" propres à ces deux approches - et recherchant une synergie entre elles représente donc un enjeu majeur pour la dynamique future de l'innovation agronomique.

■ Des situations plus complexes

Certaines situations concrètes amènent à combiner les trois types d'intégration que nous venons d'évoquer. C'est par exemple le cas lorsqu'il s'agit de développer la gestion à une échelle relativement large de ressources comme l'eau, les forêts ou les pêcheries. On a alors à intégrer à la fois diverses échelles spatio-temporelles, des disciplines variées et des acteurs multiples (en particulier lorsque ces ressources sont multi-usages) pour comprendre la dynamique de la ressource et la gérer durablement.

Autre exemple, la création de nouvelles variétés végétales (encadré 4) ou animales doit à la fois manipuler des échelles d'organisation allant du génome au peuplement, intégrer des disciplines allant de la biologie moléculaire à la sociologie et associer des acteurs variés, non seulement dans l'évaluation des produits mais dans la définition même des objectifs et dans la réalisation de la sélection.

La complexité de telles situations, mais aussi la forte attente, déjà évoquée, de la société pour une meilleure gestion de ces ressources font que ces questions constituent à notre avis de "nouvelles frontières" pour la recherche agronomique.

Vers une problématique de l'intégration ?

En revenant à nos définitions initiales et en nous appuyant sur les exemples que nous venons de décrire, il nous semble possible d'identifier un certain nombre de questions transversales qui, sans constituer une approche totalement structurée, permettent d'esquisser les étapes d'une démarche d'intégration. Nous examinerons successivement :

- la question des finalités, c'est-à-dire des propriétés recherchées ;
- la question des composantes à intégrer et de leur mode d'étude ;
- l'organisation de la dynamique des interactions, c'est-à-dire de l'architecture fonctionnelle dans laquelle s'inséreront ces composantes ;
- la conduite d'un processus d'innovation basé sur l'intégration ;
- l'évaluation de l'efficacité de ces démarches par rapport à des approches "conventionnelles".

■ Quelles finalités ?

Les propriétés que l'on souhaite obtenir dans une démarche d'intégration constituent un point majeur, que nous retrouverons au niveau de l'évaluation. On peut identifier deux options principales.

Encadré ④ L'intégration en amélioration des plantes, Jean-Christophe Glaszmann, Cirad

Une variété végétale et son usage s'intègrent dans un système de culture, également fait de pratiques culturales particulières qui répondent à des contraintes environnementales spécifiques et des objectifs de production exigeants, à la fois en quantité, en qualité et en régularité. La création de nouvelles variétés implique des choix dépassant la seule compétence du généticien ou du phytotechnicien, conciliant les points de vue et les intérêts d'acteurs multiples, mobilisant les contributions de chercheurs spécialisés dans les disciplines correspondantes. Un bon sélectionneur est un grand chef d'orchestre. Deux domaines de recherche ont récemment pris un relief important pour l'amélioration des plantes et appellent des démarches intégratives.

L'analyse du génome est stimulée par les technologies de séquençage, qui rendent aujourd'hui possible la détermination de la séquence de l'ensemble d'un génome d'une espèce cible. Le génome comporte des centaines de millions de bases et porte plusieurs dizaines de milliers de gènes hérités des deux parents, présents dans l'œuf (la première cellule) et copiés dans chaque nouvelle cellule de l'organisme. Chacun est exprimé selon une dynamique bien précise, certains dans toutes les cellules tout au long de la vie de l'organisme, d'autres dans certains types cellulaires seulement, d'autres dans certaines conditions environnementales seulement, ... Comment un tel système résulte-t-il en un peuplement variétal au comportement agronomique suffisamment prévisible pour permettre des décisions et des choix pertinents ?

Dans les cas les plus favorables, on peut rapporter à une seule différence dans le génome (une base qui change parmi plusieurs centaines de millions de bases) un comportement de la plante entière différent pour sa date de floraison, sa résistance à tel champignon pathogène, l'épaisseur de son fruit ou l'arôme de son grain. Ces cas ont généralement été repérés et résolus à partir de l'analyse de la transmission du caractère dans les descendance, accompagnée d'une cartographie génétique très fine du génome. Mais les cas de correspondance simple entre "polymorphisme" (variation de la séquence du génome) et caractère d'intérêt agronomique restent très rares.

La "biologie avancée" peut-elle nous aider à hiérarchiser les composantes héréditaires de façon à en accélérer le brassage pour créer une diversité mieux adaptée ? Différentes échelles d'organisation structurale comme la cellule, le tissu, l'organe ou l'organisme permettent de décrire le système ainsi que les mécanismes de biosynthèse qui le font fonctionner, impliquant ADN, ARN, protéines, métabolites ou hormones. Cependant de nouveaux concepts viennent régulièrement transcender les structures, comme les petits ARN, dont les fonctions commencent à se révéler à nous dans leur diversité. Différents efforts de modélisation cherchent à mimer les systèmes pour éclairer leur fonctionnement. Co-régulation de gènes, flux métaboliques, dynamiques architecturales sont autant de voies explorées. Du point de vue du sélectionneur, il s'agit de les soumettre à l'analyse de transmission dans les descendance.

Une approche alternative, au cœur de la génétique évolutive, consiste à chercher dans le génome des facteurs soumis à la sélection : les traces de sélection, et donc de contribution significative à une fonction importante, sur un gène donné peuvent être révélées en analysant sa variation (son polymorphisme) dans une population de plantes adaptées à des milieux différents. Le même raisonnement est possible entre des espèces différentes sur une branche de l'arbre de l'évolution.

On peut bien sûr comparer différentes entités taxonomiques, de l'écotype à la famille taxonomique, pour des modules et des paramètres constitutifs des modèles de comportement...

La gestion traditionnelle de l'agrobiodiversité a attiré l'attention des chercheurs face à l'échec de certains types variétaux. La plupart des agricultures traditionnelles ont mis à profit des siècles d'empirisme et élaboré des pratiques porteuses de renouveau et d'adaptation. Sans recours à une amélioration génétique formalisée... Les brassages des gènes sont assurés par l'hybridation spontanée (allofécondation partielle), favorisée par les échanges de variétés entre agriculteurs ; les choix des graines à semer pour produire les générations suivantes prennent en compte des critères particuliers ; et le tout entretient une diversité de formes au sein du même peuplement. Cette gestion de l'"agrobiodiversité" fait l'objet d'études renouvelées qui associent diverses disciplines des sciences biologiques et des sciences humaines. L'un des enjeux est de faire le meilleur usage des nombreuses formes de l'ingéniosité des hommes.

En particulier, l'entretien d'une diversité des formes au sein d'une variété est-il délibéré ? Les peuplements hétérogènes ont-ils des vertus particulières ? La capacité d'un peuplement synthétique, rassemblant des plantes porteuses de facteurs de résistance à une maladie différents, à tolérer une population de pathogènes est bien connue. Mais comment la diversité peut-elle



contribuer à conférer au peuplement une plus grande adaptabilité, une capacité accrue à accéder aux ressources du milieu, intercepter les rayonnements, utiliser l'eau de surface et l'eau de profondeur ?

La connaissance du génome commence à permettre de produire des "génotypes" qui ne diffèrent que pour quelques portions du génome et quelques caractères, et ainsi de limiter la variabilité des composantes d'un mélange à quelques caractères précis tout en assurant une homogénéité pour d'autres caractères ; par exemple concilier des architectures de plantes diverses et une production synchrone de grains ou de fruits de la même qualité.

Ces populations synthétiques, leur conception et leur caractérisation, sont des éléments que différentes disciplines pourraient choisir comme objets de recherche communs, permettant à chacun de poursuivre ses objectifs disciplinaires propres, en concert avec les autres, et ainsi de contribuer à une amélioration des plantes plus intégrative.

S'agit-il de rester dans le cadre d'une optimisation de performances agronomiques, dans un système de contraintes considéré comme connu et stable ou, au moins, prévisible ? Dans ce cas, il s'agit de prendre acte du fait qu'une approche cloisonnée, visant à améliorer indépendamment différents paramètres à partir de "courbes de réponse" obtenues expérimentalement, n'exploite qu'une partie de la variabilité totale du système, c'est-à-dire sa dimension "linéaire". Par exemple, définir le rendement d'une culture en fonction des dates de semis, des apports d'eau, d'engrais, de produits phytosanitaires peut se faire dans un premier temps en étudiant séparément les effets de ces différents facteurs mais il apparaît que des interactions nombreuses, avec des effets antagonistes ou synergiques, obligent à considérer les effets conjoints de ces facteurs pour définir effectivement la combinaison optimale.

Le problème est, dans ce cas, essentiellement technique, à savoir le caractère rapidement irréalisable de dispositifs expérimentaux visant à identifier cet optimum. Par exemple, un plan d'expérience complet étudiant deux variables ayant chacune cinq modalités possibles (avec trois répétitions) nécessite 75 parcelles mais il en faut 1 875 si l'on veut étudier simultanément quatre variables et près de 50 000 dans le cas de six variables ! C'est là que des approches alternatives, notamment par modélisation, peuvent apporter des solutions, à condition d'être alimentées par une bonne connaissance des processus impliqués.

S'agit-il au contraire de se placer dans un autre cadre de référence et de rechercher des réponses à de nouveaux défis, de s'intéresser à d'autres propriétés des systèmes de production ? Dans ce cas, le problème est à la fois technique et conceptuel. On peut citer plusieurs situations où cet élargissement du cadre apparaît nécessaire.

La première est le passage d'un univers connu, stable ou, sinon, prévisible dans ses évolutions, à un univers incertain. Cette incertitude peut concerner aussi bien des paramètres climatiques (pluviométrie, événements extrêmes), écologiques (arrivée d'espèces invasives, mutations d'agents pathogènes) que socio-économiques (fluctuations des prix, changement de compor-

tement des consommateurs). Dans ce cas, on recherchera à élaborer un système intégré non pour ses performances optimales mais pour des paramètres comme la résistance (minimisation de l'impact des perturbations), la résilience (capacité de retrouver rapidement un bon niveau de performance après perturbation) ou la flexibilité (capacité à s'adapter rapidement à un nouveau système de contraintes).

La notion de viabilité offre un cadre conceptuel global pour cette réflexion : elle s'interroge à la fois sur la performance immédiate d'un système de production (il peut s'agir de productions agricoles, forestières, de pêcheries, ...) et sur les conséquences différées des choix technico-économiques effectués pour obtenir cette performance. Ces choix peuvent en effet constituer des atouts ou, à l'inverse, des handicaps pour la performance ultérieure dans un autre ensemble de contraintes. Cette recherche de compromis et de complémentarité entre les performances successives peut notamment conduire à s'écarter d'un optimum instantané lorsqu'il implique des choix fragilisant le système.

Seconde situation, celle où la performance doit prendre en compte des externalités négatives jusque-là négligées. C'est par exemple le cas lorsque l'on étudie l'effet d'une fertilisation ou de l'utilisation d'un produit phytosanitaire en prenant en compte non seulement les rendements ou la qualité de la production mais les conséquences de ces produits sur les écosystèmes ou la santé humaine. Ces conséquences peuvent être très importantes, y compris sur des pas de temps très longs : ainsi, l'emploi du chlordécone dans les bananeraies aux Antilles dans les années 70 et 80 a permis un contrôle efficace des charançons, remplissant ainsi son rôle d'insecticide ; mais cette molécule, très stable, très peu soluble dans l'eau et d'une grande affinité avec la matière organique des sols, a entraîné une contamination durable des sols. La gestion des risques de contamination des eaux, des productions agricoles, des produits de la pêche requiert aujourd'hui une démarche intégrée de nombreuses disciplines (chimie des sols, agronomie, hydrologie, ...), à des échelles variées, dans la perspective de limiter les risques et de proposer des solutions.

Autre exemple, lorsque l'on étudie le bilan énergétique de l'alimentation animale non seulement au niveau des élevages mais en prenant en compte les coûts énergétiques liés à la production et au transport de ces aliments, on passe d'une vision selon laquelle on a amélioré - par les recherches en nutrition et en génétique - l'efficacité énergétique de l'alimentation à une vision soulignant au contraire une dégradation de ce bilan. On retrouve ici les problématiques plus générales du "cycle de vie" ou de "l'empreinte écologique".

La dernière situation que nous évoquerons est celle où l'on souhaite prendre en compte les critères sociaux du développement durable, c'est-à-dire une efficacité mesurée non en termes uniquement économiques mais en termes d'augmentation du "capital humain". Un exemple emblématique est celui des démarches d'innovation participative, dans lesquelles on cherche à associer les agriculteurs à la conception et à la production d'innovations (nouvelles variétés



végétales, nouvelles pratiques agronomiques). Par rapport à une vision technocratique privilégiant l'élaboration d'innovations par des chercheurs "professionnels", une telle démarche n'ambitionne pas seulement de produire ces innovations plus rapidement ou à moindre coût, critère pour lequel elle ne sera pas forcément plus efficace ; elle prend en compte la construction d'un réseau d'acteurs susceptible, à long terme et dans des situations variées, de continuer à élaborer les innovations qui lui seront nécessaires. Ceci prend une dimension d'autant plus forte que la mise en œuvre d'une agriculture basée sur une gestion durable des ressources naturelles (et limitant l'emploi d'intrants chimiques) reposera sur une connaissance élaborée et partagée par les acteurs des régulations à l'œuvre dans les agrosystèmes : recyclage des éléments minéraux et fixation symbiotique de l'azote, réseaux trophiques et contrôle des bioagresseurs, couverture du sol et érosion, régulation des processus hydrologiques locaux, ...

■ Les composantes et leurs propriétés

La question des composantes que l'on souhaite intégrer se décline en plusieurs préoccupations complémentaires.

La première est celle de l'inventaire de cet ensemble, qu'il s'agisse de la définition des acteurs socio-économiques que l'on souhaite associer à l'élaboration d'un nouveau "signe de qualité" d'un produit alimentaire, des disciplines que l'on veut mobiliser pour comprendre l'évolution d'un territoire ou des entités - de l'individu au paysage - que l'on veut combiner pour élaborer des stratégies de protection intégrée des cultures ou des élevages.

Cette question n'est pas spécifique de la recherche agronomique. Elle pose le problème déjà évoqué de l'utilisation appropriée du principe de parcimonie, à savoir se limiter à l'intégration des seuls éléments susceptibles de rendre compte de l'essentiel des propriétés du phénomène considéré. Pour prendre un exemple concret, celui de la consommation de viande de bœuf, les modèles économétriques prenant en compte le pouvoir d'achat et les prix relatifs par rapport à d'autres viandes rendaient compte jusque dans les années quatre-vingt de l'essentiel des fluctuations observées. Il a fallu ensuite développer des approches psychosociologiques pour comprendre des diminutions de consommation que les modèles économétriques n'expliquaient plus. Cet exemple illustre l'enjeu d'une grande réactivité pour identifier rapidement la nécessité d'intégrer de nouvelles composantes.

Cette question de la parcimonie se pose notamment dans le cas de la modélisation, où il convient d'arbitrer entre une option pragmatique n'intégrant - parfois en les simplifiant - que des processus bien compris et se présentant comme une "aide au raisonnement" et des ambitions plus exhaustives.

D'une certaine manière, l'approche parcimonieuse concerne aussi les processus d'innovation. Il peut se révéler pertinent d'identifier dans un réseau d'acteurs ceux qui peuvent effectivement jouer un rôle déterminant dans ce processus et de concentrer autour d'eux l'essentiel du dispositif.

Une préoccupation connexe concerne le “niveau” d’organisation choisi comme point de départ “explicatif”, qui conditionne en partie le niveau d’organisation d’arrivée, c’est-à-dire celui qui sera effectivement mieux “expliqué” à l’issue de l’exercice. Sans prétendre théoriser ce point de vue, il semble en effet que la compréhension, même fine, d’un niveau d’organisation donné n’éclaire souvent que le niveau d’organisation immédiatement supérieur [10]. Il convient donc d’adopter un “point de vue”, c’est-à-dire d’identifier les utilisateurs concernés par une telle approche et de privilégier leur questionnement.

Nous prendrons l’exemple de la qualité des fruits, dont l’élaboration dépend de processus complexes contrôlés par l’environnement (climat, sol, ...), les pratiques agricoles et le génotype. Deux types d’approches contrastées peuvent être *a priori* suivies :

- une approche ascendante (*bottom-up*) intégrant les acquis de la génomique et autres techniques associées, mais qui, d’un point de vue opérationnel, ne permet pas de dépasser l’échelle cellulaire et n’est pas applicable à l’échelle du fruit ; elle peut cependant orienter les travaux des physiologistes ;
- une approche descendante (*top-down*), de type “boîte noire”, lorsque le système est analysé par ses performances (ici les traits de qualité), mises en relation globalement avec les contrôles agronomiques, environnementaux et génétiques, et qui peut satisfaire les agronomes, les agriculteurs et les améliorateurs des plantes.

L’enjeu est donc d’explorer les possibilités et l’intérêt d’une approche mixte (*middle-out*) combinant les deux approches précédentes, dans laquelle le système est analysé à un niveau intermédiaire, plus fonctionnel que dans la deuxième approche mais évitant l’extrême complexité que sous-tend la première approche [11].

Une troisième problématique est celle du choix, voire de l’adaptation, de ces composantes en fonction du rôle que l’on souhaite leur faire jouer dans un système intégré. Ainsi, l’utilisation d’une culture de crucifères comme culture intercalaire, dans le but de fixer les excédents d’azote ou de réduire la population de champignons pathogènes du sol, fera appel à des espèces ou variétés différentes de celles utilisées pour des cultures de production. Cette question doit, de plus, être examinée en gardant à l’esprit que ces composantes seront choisies non seulement pour leur valeur propre mais pour les interactions qu’elles généreront au sein du système : en prenant l’exemple des réactions enzymatiques, l’introduction dans un milieu donné d’une protéine en très faible quantité peut suffire à induire des modifications majeures de la composition chimique de ce milieu. Tout en se gardant des analogies entre systèmes biologiques et sociaux, on pourrait utiliser cette même image dans le cas des acteurs sociaux, quelques individus ou un groupe de faible importance pouvant induire des changements majeurs.

La dernière préoccupation est plus spécifique de la recherche agronomique, ou plutôt de l’intégration d’entités biologiques ou sociales. C’est celle des propriétés adaptatives de ces entités,

[10] Wu J.G., David J.L., 2002. A spatially explicit hierarchical approach to modelling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling* 153: 7-26.

[11] Struik P.C., Cassman K. G., Koornneef M., 2007. A dialogue on interdisciplinary collaboration to bridge the gap between plant genomics and crop sciences. *Wageningen UR Frontis Series* 21, 319 - 328.



c'est-à-dire de leur capacité - contrairement à des entités physiques - à évoluer et à modifier leurs propriétés lorsqu'elles sont en interaction avec d'autres. Ainsi, l'introduction d'une résistance génétique à un ravageur dans une culture crée une pression de sélection susceptible de favoriser des mutations contournant cette résistance ; le développement d'une dynamique pour différencier un produit de terroir amène les acteurs partisans d'une approche banalisante (un camembert, c'est un camembert ; une banane, c'est une banane) à reconsidérer leur stratégie. Enfin, et nous l'avons déjà souligné, les pratiques des acteurs interagissent de manière complexe avec les variations de l'environnement et ces interactions peuvent parfois limiter, ou à l'inverse amplifier les conséquences de ces variations, comme dans le cas des crises de sécheresse au Sahel. Le caractère assez difficilement prévisible de ces adaptations pose le problème, que nous évoquerons plus loin, du pilotage de ces approches intégratives.

■ Quelle architecture ?

Selon quelle "architecture fonctionnelle" doit-on faire interagir les composantes précédemment définies ? Cette question est sous-tendue par le postulat, qui nous semble intuitif pour tout système organisé, que l'association des mêmes composantes peut conduire à des propriétés très différentes selon cette architecture.

Cette question peut se poser au niveau de l'organisation de l'espace. Ainsi, la mise en place d'unités d'aménagement écologique (haies et talus, bandes enherbées, zones humides, zones "refuges", ...) dans un territoire pour obtenir diverses fonctionnalités (lutte contre l'érosion, dépollution, conservation de la biodiversité) suppose d'identifier les points sensibles de ce territoire où ces unités seront efficaces. En outre, ces unités devront être reliées fonctionnellement pour jouer pleinement leur rôle. C'est toute la thématique des infrastructures écologiques, popularisée par le Grenelle de l'Environnement sous le terme de "trame verte et bleue". De même, à l'échelle de la parcelle, l'utilisation d'un mélange de variétés pour limiter la propagation de maladies dans une monoculture de blé ou celle d'un mélange plurispécifique d'arbres pour lutter contre les incendies pose des problèmes similaires de structuration. On sait, en effet, que ces phénomènes de propagation sont conditionnés, souvent avec des effets de seuil, par la distribution spatiale des hétérogénéités (il en est de même pour la percolation de polluants dans un sol).

Cette idée de raisonner la structuration spatiale au sein même d'une parcelle agricole peut sembler une curiosité théorique, dans la mesure où il semble difficile de s'écarter dans la pratique d'options simples comme un mélange aléatoire ou un semis en lignes ou bandes alternées. C'est en réalité un changement de paradigme majeur qui consiste à explorer la structure hétérogène et le fonctionnement des mélanges plurispécifiques propres à la plupart des écosystèmes naturels pour construire des agrosystèmes durables ayant les propriétés de résilience des écosystèmes naturels [12]. Les perspectives de l'agriculture de précision permettent par exemple d'envisager la mise en place, à partir d'un "patron numérique", d'organisations spatiales beaucoup plus sophis-

[12] Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2008. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for sustainable development*. DOI: 10.1051/agro:2007057

tiquées, prenant éventuellement en compte les micro-hétérogénéités de cet espace (nature des sols, humidité, ...). D'une manière plus générale, il s'agit de s'inspirer du fonctionnement des écosystèmes naturels pour concevoir des agrosystèmes basés sur une valorisation plus efficiente des ressources internes du système, limitant ainsi les entrées et sorties non désirées [13].

On retrouve des questionnements similaires au niveau de "l'architecture temporelle" du système, c'est-à-dire du séquençage et de la durée des différentes interventions possibles : une haie, une ripisylve ou une prairie ont des propriétés fonctionnelles qui évoluent avec le temps et il est important de prendre en compte ces évolutions pour permettre une certaine gestion dynamique des paysages. Il est en effet vraisemblable que la thématique de la trame verte se heurtera à des réticences si elle apparaît comme un gel définitif de certaines surfaces pour des fonctions non directement productives. Il faut donc rechercher des stratégies permettant de conserver les propriétés fonctionnelles recherchées, qui permettront par exemple la conservation du sol, la conservation de la biodiversité, la qualité des eaux de profondeur et de surface, tout en permettant une certaine fluidité de la mosaïque territoriale (rotation des cultures, localisation des jachères, exploitation forestière, substitution entre prairies et cultures). Dans ce registre de l'architecture temporelle, nous avons évoqué précédemment les perspectives d'actions qu'offrait le cadre théorique de l'écologie des perturbations. Il apparaît d'ailleurs pertinent de raisonner conjointement et de manière complémentaire ces aspects spatiaux et temporels et de parler d'architecture spatio-temporelle du système.

Les questions récentes posées par les maladies animales et leur propagation illustrent un niveau de complexité complémentaire de cette question de l'organisation spatio-temporelle. Il faut en effet considérer que les activités humaines ont contribué à "déformer" considérablement l'espace-temps physique et biologique : certaines distances sont considérablement réduites - voire la propagation rapide des agents pathogènes par les transports aériens -, d'autres deviennent quasi infinies, les infrastructures routières et ferroviaires introduisant des obstacles infranchissables pour certaines espèces ; enfin, des connections nouvelles apparaissent et prennent le pas sur les connections naturelles, comme par exemple la circulation est-ouest de la grippe aviaire, *via* les transports routiers, qui semble prédominante par rapport aux flux naturels nord-sud des oiseaux migrateurs.

On pourrait prendre également l'exemple du cycle de l'eau, avec le rôle que jouent aujourd'hui les drainages, pompes, retenues, réseaux de collecte et autres canalisations dans l'accélération, le ralentissement ou la réorientation de certains flux, avec tous les risques émergents liés à cette nouvelle architecture. Cette "anamorphose" de l'espace-temps est donc un phénomène majeur à prendre en compte.

Cette question de l'architecture est également posée aux sciences sociales : selon quels processus, dans quel cadre, faut-il faire interagir les acteurs pour contribuer à l'élaboration d'un pro-

[13] Ewel J.J., 1999. Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry Systems* 45, 1-21.
Lefroy E.C., Hobbs R.J., O'Connor M.H., Pate J.S., (eds.), 1999. *Agriculture as a Mimic of Natural Ecosystems*. Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture, Kluwer Acad. Pub., (37) 436 p.



duit de qualité ou à la prise en compte d'enjeux environnementaux ? Quels sont les flux d'information pertinents à mettre en place entre ces acteurs ? Quel positionnement des chercheurs "professionnels" dans ces dispositifs ?

■ La conduite du processus

Nous souhaitons aborder maintenant la question de la mise en place d'une démarche d'intégration, en particulier lorsqu'elle vise des finalités comme la capacité d'adaptation à un univers incertain. En effet, nous avons évoqué à plusieurs reprises les limites prédictives des approches du comportement de systèmes complexes, notamment les limites de la démarche expérimentale en milieu contrôlé. Il est donc nécessaire de développer d'autres approches - modélisation, recherche-action (c'est-à-dire implication des chercheurs dans un processus de changement pour en comprendre la dynamique - qui devront se développer de manière itérative avec les données empiriques recueillies sur le terrain et non selon un schéma linéaire de recherche-développement-diffusion. Ces dispositifs d'apprentissage devront notamment se doter d'observatoires appropriés (encadré 5), cette notion d'appropriation combinant la pertinence technique (capacité d'observer les phénomènes) et la pertinence sociale (appropriation par l'ensemble des acteurs concernés, gage de la durabilité de tels observatoires). Ces observatoires devront également être capables d'observer des externalités imprévues - positives ou négatives - de ces innovations, pour prendre en compte le caractère par nature difficilement prédictible de l'émergence de propriétés dans un système complexe.

Cette démarche rejoint le concept "d'innovation précautionneuse" développé notamment par Bruno Latour [14], à savoir une démarche où l'application du principe de précaution n'intervient pas *a posteriori*, pour des innovations déjà élaborées, mais interagit en permanence avec le processus d'innovation. Elle implique également une analyse particulière de l'adéquation entre les échelles auxquelles se déroulent les processus biologiques et physiques en jeu et celles où s'observent les dynamiques humaines et s'appliquent les politiques.

■ Quelle évaluation ?

Nous avons commencé à évoquer cette question à propos des finalités d'un processus d'intégration. En effet, sauf à affirmer de manière dogmatique la supériorité systématique de cette démarche, la recherche agronomique ne peut se soustraire à la question de l'efficacité comparée de ces approches par rapport à d'autres, plus conventionnelles, qu'il s'agisse du coût financier ou du temps nécessaire, lié notamment à l'investissement souvent élevé qu'impose la construction d'un dialogue véritable entre disciplines ou entre acteurs. Nous nous bornerons ici à trois remarques.

La première est la nécessité d'évaluer cette efficacité sur des pas de temps suffisamment longs et des espaces suffisamment étendus, et donc d'intégrer des critères de résilience et de durabi-

[14] Latour B., 2008.
A Cautious Prometheus?
A Few Steps Toward
a Philosophy of Design.
Keynote Lecture for the
"Networks of Design".
Meeting of the Design History
Society, Falmouth, Cornwall,
3d September 2008.

Encadré 5 Opérationnaliser l'intégration d'une diversité d'intérêts autour d'une ressource sur un territoire : l'exemple de l'Observatoire Agriculture et Territoire, Marco Barzman, Inra

L'Observatoire Agriculture et Territoire est une initiative devant permettre à une diversité d'acteurs sur un territoire de co-construire et d'utiliser un système d'information sur la gestion d'une ressource à usage multiple. Le "produit" attendu est un centre de ressources d'informations, mais le processus d'élaboration de l'observatoire crée également un lieu de négociation et de coordination. La démarche de montage de ce dispositif d'action collective s'appuie sur l'élaboration participative d'un système d'information autour d'un enjeu de territoire lié à l'activité agricole. L'objectif à long-terme est d'améliorer la capacité des acteurs du territoire à maîtriser les évolutions et à anticiper les aléas en s'appuyant sur des informations collectivement élaborées.

Trois observatoires territoriaux ont été mis en place en janvier 2005 :

- dans un sous-bassin versant de la Charente dans un contexte où la disponibilité de l'eau pour l'irrigation du maïs est en concurrence potentielle avec d'autres usages territoriaux de l'eau ;
- dans une vallée du Bas Dauphiné où un groupement de producteurs laitiers veut faire connaître les progrès effectués en matière de réduction de pollution de l'eau par des produits phytosanitaires ;
- sur le plateau de Millevaches autour du maintien des tourbières et des landes par le pâturage ovin comme alternative à l'emprise de la forêt.

Les résultats en terme de système d'information produit restent à évaluer. Mais l'expérience acquise montre déjà que le processus de montage de ces observatoires locaux a permis à des acteurs représentant une diversité de domaines d'intérêt souvent en conflit (irrigation, élevage, pêche, protection de l'environnement, eau potable, collectivités, réglementation, ...) de dialoguer et de construire un dispositif commun. Un système d'information, en plus de sa valeur intrinsèque, apparaît comme un objet intermédiaire particulièrement bien adapté à la gestion collective - potentiellement conflictuelle - d'une ressource sur un territoire. Il permet aux acteurs locaux d'entrer progressivement dans la problématique en passant d'abord par une définition collective de l'information jugée pertinente.

Référence : Barzman M., Bouarfa S., Bots P., Ruelle P., Martinand P., Caron P., Passouant M., Levraut F., Ferrané C., 2007. Analyse *a posteriori* d'une démarche d'observatoire dans un contexte conflictuel : cas de l'irrigation en Charente. *Ingénieries EAT* (51) 47-57 ; et http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/observatoire_rapport_final.pdf

lité plutôt que des performances instantanées et localisées : on sait par exemple qu'en génétique, des stratégies privilégiant un fort progrès à court terme - et donc favorisées par des opérateurs privés pour des raisons évidentes de compétitivité - peuvent se révéler moins efficaces à long terme que des approches plus complexes, intégrant la conservation d'une forte variabilité génétique, en particulier lorsque les objectifs d'amélioration peuvent être amenés à changer ou qu'une trop forte homogénéité génétique rend le système particulièrement vulnérable aux agents pathogènes. D'une manière plus générale, l'agriculture conventionnelle intensive s'est focalisée sur des gains à court terme, aux échelles de l'exploitation agricole et de l'agro-industrie. Les impératifs de durabilité ont aujourd'hui modifié ces échelles, nécessitant l'évaluation à long terme des fonctionnalités des agro-écosystèmes sur des mailles paysagères ou régionales. Deuxième remarque, il sera indispensable de mesurer l'efficacité au niveau des utilisateurs finaux et de l'appropriation effective de ces innovations et non pas au niveau de la performance à la sortie du laboratoire, de la station expérimentale ou des essais multilocaux : cette distinction entre l'évaluation des "inventions" et l'évaluation de leurs impacts peut là aussi aboutir - mais il faut s'en assurer - à des inversions de classement entre les différentes approches. En



particulier, si l'on admet que toute innovation se traduit, lorsqu'elle est largement diffusée, par des externalités imprévues, positives ou négatives, il conviendra de prendre en compte l'ensemble de ce bilan et pas seulement la réalisation effective de la performance visée. La question des OGM est ici particulièrement illustrative : le riz doré, à haute teneur en vitamine A, est-il efficace pour résoudre les cécités résultant de carences chez les plus pauvres ? Le généticien l'a longtemps pensé, mais le débat international sur cette question (et surtout la position des nutritionnistes et des sociologues) a bien montré la multiplicité des causes à considérer pour résoudre ce problème majeur de santé publique. Intégrer les points de vue de disciplines différentes conduit ici à proposer des solutions différentes.

Enfin, et c'est à notre avis l'aspect le plus important, cette évaluation devra intégrer les critères du développement durable, qu'il s'agisse de l'amélioration du "capital humain" que représente un réseau d'acteurs effectivement capable de produire les innovations qui lui sont nécessaires ou du capital social et culturel que constitue le système d'échanges mis en place pour gérer des ressources, système d'échanges qui peut être le support de bien d'autres formes de solidarité et de diffusion des connaissances. L'échec des stratégies passées visant à améliorer la productivité de filières clés pour résoudre les questions de développement dans les pays du Sud traduit en grande partie l'absence de prise en compte des besoins et opportunités des paysans pauvres et du contexte écologique et social dans lequel s'inscrit leur action. La mise en œuvre d'une gestion "intégrée" des ressources naturelles, qui prend en compte (intègre) des interactions entre des systèmes écologiques et des systèmes sociaux devient dès lors une priorité. On peut relier à cette préoccupation les notions de "construction de compétences" ou de renforcement des "capacités d'apprentissage", qui sont souvent promues - au moins dans les discours - comme critères d'évaluation de la recherche agronomique pour le développement.

Conclusion

À l'issue de cette exploration, est-il possible de répondre à la question initiale, à savoir le caractère d'un art - au sens artisanal et empirique où nous l'avons défini - ou d'une science de la démarche d'intégration ?

Auparavant, il convient de souligner l'enjeu concret - et non seulement intellectuel - de cette interrogation, qui est à notre avis celui de l'implication forte des chercheurs dans de telles démarches. En effet, dans une conception "classique" de la recherche, on peut défendre une vision selon laquelle l'intégration est un processus qui se situe "à l'aval" et relève donc de la dynamique des acteurs économiques ou sociaux. La recherche a donc comme mission d'alimenter ce processus, en produisant des "éléments de connaissance", voire des méthodes et outils pour l'intégration, ces productions élémentaires étant élaborées et évaluées selon des démar-

ches scientifiques reconnues. Quand on connaît le rôle déterminant des critères et processus d'évaluation dans la dynamique scientifique, on mesure aisément combien l'affirmation que l'intégration ne relève pas de la science ne peut que légitimer cette vision classique et dissuader les chercheurs de s'y impliquer.

Que peut-on donc dire sur la "scientificité" de la démarche d'intégration ? Assurément, l'analyse et les exemples qui précèdent montrent que la démarche d'intégration a largement dépassé le statut de pratique subjective et intuitive, réservée à quelques "virtuoses" ou experts. Elle constitue souvent une démarche organisée et explicite de l'ingénieur. Elle constitue aussi une tendance forte, largement opposée au réductionnisme idéologique, dans l'évolution des sciences. Assimiler la démarche d'intégration à une "démarche scientifique" reste néanmoins un point de vue qui doit être davantage argumenté : il convient pour cela de distinguer les dimensions inductive et déductive de la démarche scientifique.

Dans sa phase inductive - élaboration d'une hypothèse, d'une théorie - la science fait appel à une créativité, à des intuitions qui relèvent à notre avis du même registre que la démarche artistique. L'intégration, qu'il s'agisse d'identifier les composantes pertinentes et leur complémentarité éventuelle ou de formuler une hypothèse sur l'organisation spatiale ou temporelle adéquate, a une dimension inductive évidente, peut-être plus marquée que des approches plus analytiques. En reprenant l'analogie mathématique, on sait l'intuition que nécessite la recherche d'une fonction intégrale, comparée au caractère besogneux de la définition d'une fonction dérivée ! Mais cet aspect ne permet pas, comme nous venons de le dire, de trancher notre question initiale.

Au niveau déductif, la science se caractérise par la volonté de tester de manière objective une théorie ou une hypothèse, ce caractère testable - et donc réfutable - étant pour certains un critère nécessaire et spécifique des hypothèses et théories scientifiques. Par rapport à cette exigence, nous avons esquissé dans la troisième partie de cette note les étapes d'un processus d'intégration qui nous semblent donner prise à un examen critique de sa pertinence et donc à une évaluation de ceux qui la pratiquent.

Mais nous laisserons ouverte la question suivante : peut-on parler de l'émergence d'une "science de l'intégration" ou convient-il plus modestement d'évoquer "les sciences et techniques de l'intégration" ? Par rapport à cette question, et pour montrer que ces interrogations d'aujourd'hui nous relient à des réflexions déjà anciennes, nous nous demanderons seulement si nous ne parlons pas en fait de la "technologie", au sens d'André Leroi-Gourhan et d'André-Georges Haudricourt [15], c'est-à-dire d'un "discours épistémologique" sur les techniques et les pratiques. En effet, les objets créés ou utilisés par les hommes, et en particulier ceux de l'agronomie, ne sont-ils pas en fait, et depuis toujours, les fruits de processus d'intégration empirique, combinant des facteurs physiques, biologiques, sociaux et culturels, processus dont nous avons essayé ici de comprendre la dynamique et les enjeux ?

[15] Haudricourt A.G., 1987. *Technologie, science humaine*. Éd. de la MSH, Paris.